

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИНХРОННЫХ ТУРБОМАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ

Исцелемов Д. А.

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет,  
г. Пермь, Россия, [distselemov@yandex.ru](mailto:distselemov@yandex.ru)

**Аннотация** — Рассмотрены основные требования, предъявляемые к процессу испытания синхронных неявнополюсных машин по требованиям ГОСТ, МЭК и Института инженеров по электротехнике и электронике (США). Показаны основные недостатки применяемых методов, предложены методики, позволяющие их устранить. На основании данных методик разработан программный комплекс для автоматизации испытаний и определения основных параметров синхронных турбомашин, произведена его проверка на исходных данных ранних стендовых испытаний, моделях разных типов и реальном синхронном генераторе. Сделаны выводы о достоверности определения параметров и возможностях применимости данного комплекса.

Работа выполнена по гранту РФФИ №14-07-00104 «Разработка мобильной испытательно-диагностической станции электрических машин переменного тока»

**Ключевые слова** — синхронная машина, испытания, характеристики, определение параметров, аналитические методы, аппроксимация, оптимизация, автоматизация, программный комплекс.

## ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины (ЭМ) находят самое широкое применение во многих сферах деятельности человека. В частности, синхронные электрические машины (СМ) средней и большой мощности широко применяются в электроэнергетике, в системах электрического привода с постоянной частотой вращения, а с появлением систем частотного привода стали также применяться в системах с регулированием скорости большой мощности.

Одним из важнейших показателей качества ЭМ является их надёжность, т. е. способность выполнять свои функции в течение заданного срока. Данное качество особенно ценно для крупных машин, которые не только имеют высокую стоимость, но и, как правило, эксплуатируются на ответственных производственных объектах, что предъявляет к ним особые требования надёжности. Проверка соответствия рабочих свойств машин, в том числе и надёжности, заявленным характеристикам производится путём испытаний в процессе изготовления и эксплуатации. По результатам испытаний судят не только о соответствии ЭМ требованиям стандартов и нормалей, но и ведут косвенный контроль над правильностью

технологического процесса производства. Необходимо также отметить, что только в процессе испытаний можно доказать или опровергнуть теоретические положения, выдвигаемые в процессе развития теории электрических машин.

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

К процессу испытаний, как и к процессу производства ЭМ предъявляются требования, которые оговариваются в соответствующих стандартах. Для анализа текущего положения вещей в данной области были проанализированы требования основных стандартов Российской Федерации (ГОСТ) [1], [2], [3], [4], [5], Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) [6], [7], [8], [9] и Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) [10], [11], [12] к испытаниям СМ. Также был рассмотрен ряд публикаций, авторы которых предлагают новые опыты для определения основных параметров СМ, либо новые методы обработки результатов существующих опытов [13], [14], [15], [16], [17].

На основании анализа указанных документов применительно к неявнополюсным СМ можно сделать следующие выводы:

основные опыты и методы обработки их результатов, приведённые в стандартах разных стран, совпадают, в той или иной мере отличаются процедуры подготовки к экспериментам или процедуры их проведения (характерно для стандартов IEEE);

в ходе испытаний должен быть определён ряд параметров, характеризующих электромагнитные свойства машины и номинальные параметры её работы, проверены массогабаритные параметры и эксплуатационные характеристики, сняты характеристики холостого хода, установившегося короткого замыкания, V-образная и регулировочная (только для генераторов);

испытания СМ в основном состоят из опытов холостого хода, короткого замыкания, V-образной характеристики, нагрузочном испытании и испытании в длительном режиме для определения нагревов;

индуктивные сопротивления и постоянные времени СМ определяются из опытов с нарушением

электромагнитного равновесия машины, причём основным рекомендованным опытом является опыт внезапного трёхфазного короткого замыкания (ВКЗ); для определения ряда параметров СМ проводятся специальные измерения (сопротивление обмоток постоянному току, сопротивление изоляции, показатели уровня шума и вибрации и др.); определение большинства параметров СМ производится путём графоаналитической обработки результатов экспериментов, отсутствуют их аналитические интерпретации и разработанные алгоритмы; определение коэффициента полезного действия (КПД) неявнополюсных СМ рекомендуется выполнять косвенными методами, в частности, методом тарированного двигателя; индуктивные сопротивления и постоянные времени СМ могут быть получены альтернативными способами, например, подачей в одну из обмоток СМ дополнительного сигнала с последующей обработкой результата отклика, методом сброса нагрузки и другими (данные методы не включены в стандарты и являются экспериментальными) [13], [14], [15], [16]; разрабатываются альтернативные методы обработки результатов опыта ВКЗ, в частности, вероятностно-статистический метод [17]; не смотря на наличие альтернативных методов определения параметров СМ, в первую очередь необходимо руководствоваться требованиями стандартов, которым данные машины должны соответствовать, т.е. использовать приведённые в них опыты и методы обработки результатов.

#### ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СМ

Основными статическими параметрами СМ являются следующие: синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси  $X_d$  (насыщенное и ненасыщенное значение), расчётное индуктивное сопротивление  $X_r$ , ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению по характеристике холостого хода  $I_{f0}$ , номинальный ток возбуждения  $I_{fn}$ , ток возбуждения при установившемся коротком замыкании (КЗ)  $I_{fk}$ , соответствующий номинальному току обмотки якоря (ОЯ), составляющая тока возбуждения воздушного зазора  $I_\delta$ , отношение короткого замыкания  $K_c$ , статическая перегружаемость  $m_{\max}$ , ток реакции якоря, приведённый к ротору  $I_a$ , ток симметричного короткого замыкания  $I_k$ , коэффициент насыщения стали сердечника  $K_{\text{нас}}$ , кратность тока короткого замыкания, отдельные составляющие потерь и КПД СМ. Данный перечень значительно расширен по сравнению с минимальным набором параметров, которые необходимо определять по требованиям стандартов.

Данные параметры могут быть определены по предварительно снятым характеристикам холостого хода и установившегося короткого замыкания, а также точке нагрузочной характеристики при номинальном напряжении и токе ОЯ в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности равном нулю [5], [7], [12].

Данная точка нагрузочной характеристики может быть получена из V-образной характеристики.

Одновременно со снятием характеристик холостого хода и короткого замыкания могут параллельно сниматься характеристики потерь холостого хода и потерь короткого замыкания испытуемой СМ по методу тарированного двигателя для определения отдельных составляющих потерь и КПД [3], [18].

Для определения статических параметров, потерь и КПД была разработана методика, представляющая собой аналитическую интерпретацию графических методов, изложенных в стандартах. В основе методики лежит аппроксимация вышеперечисленных характеристик уравнениями регрессии различных порядков с контролем среднеквадратичной нормы. Для исключения случайных выбросов при аппроксимации применено известное правило «3 $\sigma$ » [19]. В дальнейшем по найденным аналитическим зависимостям производится построение векторной диаграммы, и по аналитическим выражениям определяются основные статические параметры СМ.

Мощность потерь испытуемой машины находится с использованием тарировочной характеристики гонного двигателя. Если в качестве такового выступает асинхронный (АД), для определения потребляемой активной мощности используется специально разработанный виртуальный прибор (ВП) для определения угла сдвига фаз между напряжением и током [20].

Разработанный алгоритм лёг в основу созданных автором ВП, объединённых в 4 подпрограммы, для снятия указанных выше характеристик и определения основных статических параметров СМ. ВП были написаны в среде разработки «LabVIEW®» [21].

Для значительного сокращения времени снятия характеристик испытуемой машины в автоматическом или ручном режиме в разработанных подпрограммах синтезирован контур регулирования по напряжению ОЯ с ПИД-регулятором, обеспечивающим значительную форсировку возбуждения с допустимым значением перерегулирования. Для определения оптимальных параметров регулятора, отвечающих критерию модульного оптимума, создан специальный ВП. Данный ВП производит снятие переходной характеристики СМ, на основании которой и рассчитываются коэффициенты регулятора.

#### ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СМ

Под динамическими параметрами СМ понимают индуктивные сопротивления и постоянные времени. Они имеют очень важное практическое значение, т.к. определяют поведение машины в динамике (например, при изменении режима работы сети для СГ). На основании этих данных производится большое число расчётов в электроэнергетике и электроприводе.

Основным опытом определения динамических параметров СМ на протяжении более 75 лет является опыт внезапного трёхфазного короткого замыкания [5], [12]. Данный опыт рекомендуется всеми перечисленными в начале статьи стандартами.

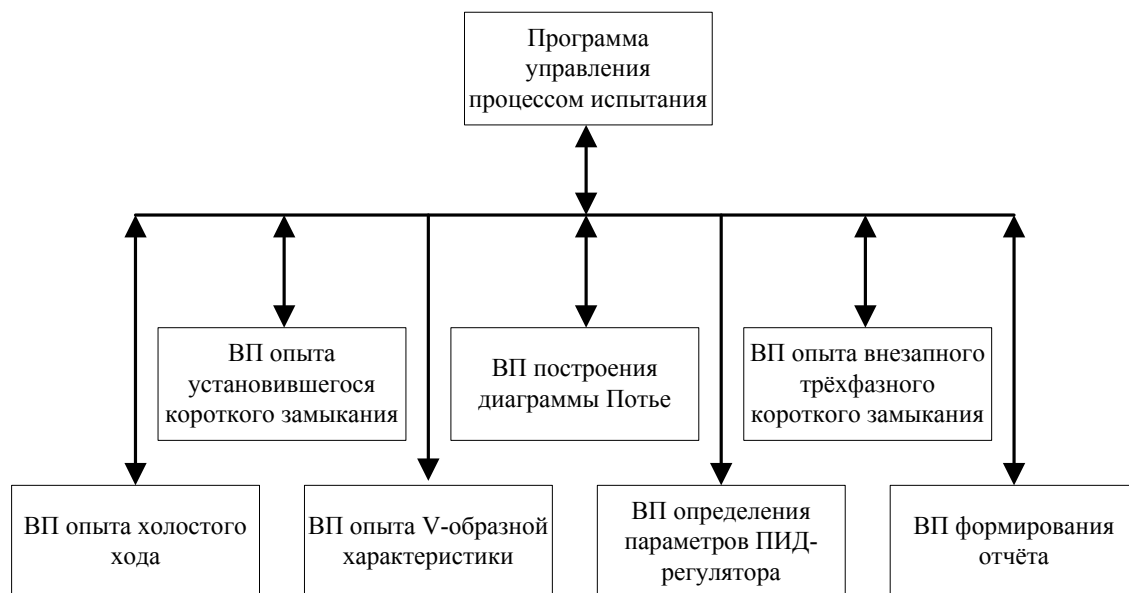


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса SMTTest.

Подготовка к проведению опыта ВКЗ требует особой тщательности в виду зависимости от этого конечных результатов. Все искомые величины получаются путём обмера и обработки, полученных при проведении опыта, осциллограмм, и потому зависят от их правильности, чёткости и точности определения масштабов. Обработка результатов включает в себя большой объём расчётно-графических работ. Поэтому вопросы автоматизации проведения опыта и обработки его результатов имеет важное практическое значение.

Для автоматизации опыта ВКЗ был разработан следующий алгоритм:

регистрация токов переходного процесса в трёх фазах ОЯ и ОВ;

определение вершин переходного процесса методом скользящей тригонометрической аппроксимации [22], обладающей фильтрующими свойствами с целью снижения влияния индустриальных помех и шумов, появление которых возможно в измерительных трактах;

определение начальных значений и постоянных времени СМ комбинированным методом, при котором сначала определяются методом наименьших квадратов (МНК) по конечным аналитическим выражениям приближенные границы оценки параметров переходной и сверхпереходной составляющих при их пораздельном и совместном рассмотрении, а затем осуществляется оптимизация (уточнение параметров) методом покоординатного спуска по области нелинейных компонентов (постоянных времени) с аналитическим определением на каждом шаге линейных компонент (начальных значений составляющих) МНК [18], [23];

определение индуктивных сопротивлений и ударного тока КЗ.

На основании данного алгоритма автором был разработан ряд ВП, объединённых в единую подпрограмму для проведения опыта ВКЗ и

аналитического определения на основе полученных данных динамических параметров СМ.

#### СТРУКТУРА РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Разработанные автором подпрограммы и ВП объединены в единый программный комплекс, названный SMTTest, который позволяет полностью автоматизировать процесс снятия характеристик и определения основных параметров неявнополюсных СМ средней и большой мощности на заводе-изготовителе или ремонтном предприятии. Укрупнённая структурная схема комплекса изображена на рисунке 1. Программное обеспечение может быть адаптировано к конкретным требованиям производственного процесса.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программный комплекс был протестирован на реальной информации, взятой из отчётов ранних заводских испытаний, математических моделях СМ, выполняемых в среде реального времени на контроллере NI PXIe-8133 [аппаратно-программное (HIL) моделирование], а также на компьютеризированном лабораторном стенде кафедры «Электротехники и электромеханики» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Анализ полученных результатов показал высокую достоверность в идентификации параметров испытуемых СМ. Так, при достижении уровня помех 30% от номинального напряжения ОЯ отклонение в идентификации параметров не превышало 5% [18].

Использование программного комплекса позволит [23]:

увеличить производительность испытательных стендов, значительно снизив время снятия характеристик;

увеличить точность и достоверность испытаний, исключить в результатах субъективные ошибки; автоматически формировать отчёт о результатах испытаний; создать архив результатов испытаний всех выпущенных машин; построить автоматизированную систему управления качеством производства электрических машин.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 52776-2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. Введ. 2007 — 10 — 31. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008. 69 с.
2. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Введ. 1987 — 07 — 01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 32 с.
3. ГОСТ 25941-83. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия. Введ. 1984 — 01 — 01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 30 с.
4. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением подвижного состава). Введ. 2011 — 12 — 09. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008. 58 с.
5. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трёхфазные синхронные. Методы испытаний. Введ. 1978 — 01 — 01. М.: Ордена «Знак почёта» Издательство стандартов, 1984. 82 с.
6. IEC 60034-1. Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance. Edition 12.0. 2010 — 02. Geneva: IEC Central Office, 2010 — 144 P.
7. IEC 60034-4. Rotating electrical machines — Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests. Edition 3.0. 2008 — 05. Geneva: IEC Central Office, 2008 — 158 P.
8. IEC 60034-2-1. Rotating electrical machines — Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles). Edition 1.0. 2007 — 09. Geneva: IEC Central Office, 2007 — 154 P.
9. IEC 60034-2-2. Rotating electrical machines — Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests — Supplement for IEC 60034-2-1. Edition 1.0. 2010 — 03. Geneva: IEC Central Office, 2010 — 56 P.
10. C50.12-2005 — IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above. 2006 — 02 — 15. NY: IEEE, 2006 — 45 P.
11. C50.13-2005 — IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above. 2005 — 12 — 29. NY: IEEE, 2005 — 60 P.
12. 115-2009 — IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part I — Acceptance and Performance Testing Part II — Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis. 2010 — 05 — 07. NY: IEEE, 2010 — 224 P.
13. Makela O. Parameter Estimation For A Synchronous Machine: Master's Thesis. Espo. 17.08.2007. 48 P.
14. Karrari M., Malik O.P. Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator From Online Measurements // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 06.2004. — Vol.19, №2. — P.407 — 415.
15. Bortoni E. da C., Jardini J.A. Identification of Synchronous Machine Parameters Using Load Rejection Test Data // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 06.2002. — Vol.17, №2. — P.242 — 247.
16. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. Модернизация вероятностно-статистических методов исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. — 2010. — №6. — С. 20 — 26.
17. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. Вероятностно-статистические методы исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. — 2010. — №8. — С. 22 — 28.
18. Software for testing alternators of heavy-duty trucks and cars / Eduard Lyubimov [et al.] // SAE World Congress 2012. — Detroit, Michigan, 2012. — 2012-01-0022. — 14P.
19. Исцелемов Д.А., Любимов Э.В., Нургатин Р.Ф. Комплекс программ для автоматизации испытаний синхронных турбомашин // Электротехника — 2010. — №6. — С.27-32.
20. D.A. Istselemov, E.V. Lubimov, N.A. Belyaev. A Virtual Instrument for Determining Basic Parameters of Sinusoidal Signals in Stationary Modes // Russian Electrical Engineering — 2013. — Vol.84 — No.11 — P.626-629.
21. Программное обеспечение для испытаний генераторов переменного тока большегрузных и легковых автомобилей / Э. В. Любимов [и др.] // Электронный портал «русский инженер-транспортник». — URL: <http://www.rusaen.ru/index.php/main/item/articles/64.html> (дата обращения 13.03.2013).
22. Программный комплекс для определения параметров синхронных машин / Д. А. Исцелемов [и др.] // Проблемы рационального природопользования: материалы международной научно-технической конференции — Пермь: Перм. гос. тех. ун-т, 2008. — С. 293-297.
23. Демонстрационный стенд мобильной испытательной станции электрических машин переменного тока / Э.В. Любимов [и др.] // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VI международной научно-технической интернет-конференции, Пермь, 1 — 30 ноября 2012 г. — Издательство ПНИПУ, 2012 — С.193 — 204.